

佐賀大農彙 (Bull. Fac. Agr., Saga Univ.) 71 : 139~144 (1991)

## 不飽和過圧縮土のせん断特性について

藤本 昌宣

(生産情報科学講座)

平成3年5月31日受理

### On Characteristics of Shearing Strength of Unsaturated Over-compressed Soil

Masanobu FUJIMOTO

(Laboratory of Agricultural Land Engineering)

Received May 31, 1991

#### Summary

The characteristics of shearing strength of unsaturated over-compressed soil under the constant volume were experimentally investigated by means of the improved direct shear apparatus.

The following results were obtained.

- (1) Shearing strength  $\tau_f$  were expressed as

$$(\tau_f/\sigma)_{oc} = (\tau_f/\sigma_0)_{nc} \cdot OCR,$$

$$(\sigma'_f/\sigma)_{oc} = (\sigma'_f/\sigma_0)_{nc} \cdot OCR,$$

$$(u_f/\sigma)_{oc} = 1 - (\sigma'_f/\sigma_0)_{nc} \cdot OCR,$$

in which  $\sigma$  ; initial normal stress,  $\sigma_0$  ; precompression stress, OCR ; over-compression ratio.

- (2) Shearing strength increased almost linearly with effective normal stress.

- (3) Pore pressure became a negative value when over-compression ratio was above 2.

Key words : unsaturated soil, over-compression, shearing strength, pore pressure

#### 緒 言

土のせん断強さは、土の種類、土の状態（密度、含水比、応力履歴など）によって決定される。本研究では、不飽和土の過圧縮強度特性を明らかにするために、最適含水比に調整した土を静的な応力の載荷あるいは除荷によって、種々の過圧縮比を持つ供試体を作成し、これについて一面せん断試験を行い、不飽和過圧縮土のせん断強さの特性について実験的に検討したものである。なお、対象が不飽和土であるため、飽和土での「圧密」をここでは「圧縮」とした。

#### 実 験 方 法

実験に使用した土は佐賀県東背振村で採取したまさ土で、風化の程度は中位である。その土粒子比重は2.741で、三角座標分類によれば砂質ロームに属する。また、標準突固め試験(10cm モールド, 2.5kg ランマー使用, 3層25回締固め)<sup>1)</sup>によって得られた締固め曲線を Fig. 1に示す。

最適含水比は10.8%, 最大乾燥密度は1.985g/cm<sup>3</sup>である。この結果からせん断試験における供試土の含水比を最適含水比に近い10%になるよう調整した。せん断試験は改良型一面せん断試験機を用い、せん断方法は圧縮(圧密)定体積せん断とした。試料の乾燥重量は、せん断箱の大きさを考慮して90gfと一定にし、できるだけ緩くかつ均一にせん断箱に詰めた。試験は、先行圧縮応力を0.4, 0.8, 1.6, 3.2および6.4kgf/cm<sup>2</sup>とし、過圧縮比を1, 2, 4, 8, 16および32とした20種類の過圧縮状態で行った。またせん断速度は約1 mm/min. とした。

## 実験結果と考察

### 1. 水平変位～せん断応力, 垂直応力の関係

供試した土に先行圧縮応力  $\sigma_0$  を付加して十分圧縮した後、所定の過圧縮比(先行圧縮応力/せん断時の垂直応力)OCR に相当する垂直応力  $\sigma$  まで除荷して膨張させ、定体積せん断を行った。せん断中における水平変位  $d_h$  の増加にともなうせん断応力  $\tau$  および有効垂直応力  $\sigma'$  の変化を  $\sigma_0$  が6.4kgf/cm<sup>2</sup>の場合についてFig. 2に示す。総体的にせん断強さのピークが認められなかったため、 $d_h$  が8 mmでの値を破壊時のせん断強さ  $\tau_f$  とした<sup>1)</sup>。また $\sigma'$  はせん断中に試料の体積を一定に保つために、せん断開始時は $\sigma' = \sigma$ であるが、次第に変化する。先行圧縮応力が一定の場合、OCR が大きくなるほど試料の破壊時の $\sigma'$ は $\sigma$ に比較して大きくなる。

### 2. せん断強度特性

せん断当初の垂直応力  $\sigma$  とせん断強さ  $\tau_f$  の関係をFig. 3に示す。正規圧縮状態では $\sigma_0 \sim \tau_f$ は原点を通る直線で表されるが、同じ $\sigma_0$ を持つ過圧縮領域では $\sigma \sim \tau_f$ はいずれも上方に凸状の曲線となる。特にOCRが大きくなると曲率が大きくなることが認められる。また、 $\sigma$ が一定の場合 $\tau_f$ は $\sigma_0$ の増加、すなわちOCRの増加につれて大きくなる。さらに、OCRの等しい( $\sigma, \tau_f$ )点を結ぶとほぼ直線となり、OCRが大きくなって過圧縮性が高くなるほどその直線の勾配は大きくなる。

このような圧縮定体積せん断においては $\Delta\tau_f/\Delta\sigma$ は垂直応力に対する非排水(気)せん断強さの増加率を表すものである。前述のように、OCRが等しい場合いずれも $\sigma \sim \tau_f$ がほぼ原点を通る

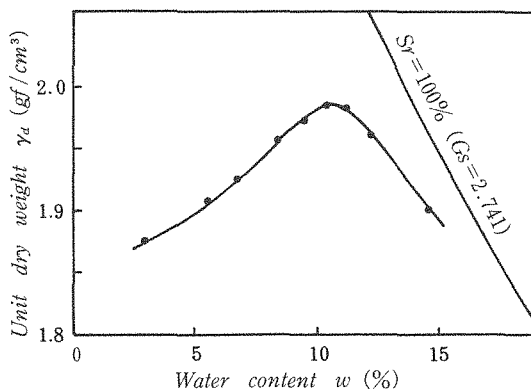


Fig. 1 Compaction curve.

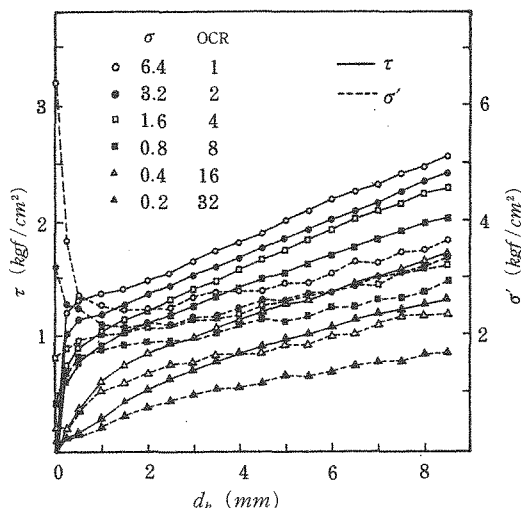


Fig. 2 Variations of shearing stress  $\tau$  and normal stress  $\sigma'$  to horizontal displacement  $d_h$ .

直線（図中の破線）となるので、 $\tau_f/\sigma$ がそのまま強度増加率となる。正規圧密粘土では、土の種類や応力条件などによって異なるが、強度増加率は0.3~0.6の範囲にあることが多い<sup>2)</sup>。

本実験に使用した土の場合、OCRと強度増加率 $\tau_f/\sigma$ の関係を両対数紙上にプロットするとFig. 4のようになる。この関係式を最小自乗法によって求めると、

$$(\tau_f/\sigma)_{oc}$$

$$= (\tau_f/\sigma_0)_{NC} \cdot OCR^a \quad (1)$$

$$= 0.406 \cdot OCR^{0.819} \quad (2)$$

$$\tau_f = 0.406 \cdot \sigma_0 \cdot OCR^{-0.181} \quad (3)$$

となる。ここで、 $(\tau_f/\sigma)_{oc}$ 、 $(\tau_f/\sigma_0)_{NC}$ はそれぞれ過圧縮および正規圧縮状態の強度増加率である。 $(\tau_f/\sigma_0)_{NC}$ は0.406で、OCRの増加につれて強度増加率は大きくなる。なお、西原ら<sup>3)</sup>は広島県東部で採取したまさ土について同様の実験を行い、 $a=0.88$ を得ている。

### 3. せん断強さと間隙比の関係

せん断前の $\sigma_0$ による圧縮と $\sigma$ による膨張によって得られる試料の間隙比は、定体積せん断であるため破壊時の間隙比 $e_f$ と同じである。粘性土の圧密試験結果の表示方法と同様に、この $e_f$ と $\log \sigma$ の関係をFig. 5に示す。これらの関係は非常に緩い状態の試料

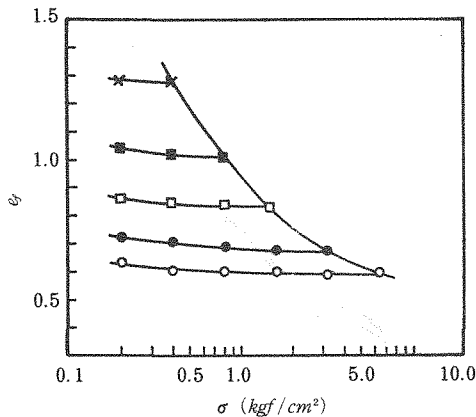


Fig. 5 Relations between initial normal stress  $\sigma$  and void ratio at failure  $e_f$ .

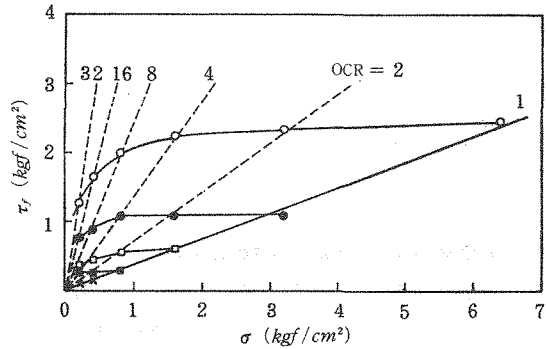


Fig. 3 Relations between initial normal stress  $\sigma$  and shearing strength  $\tau_f$ .

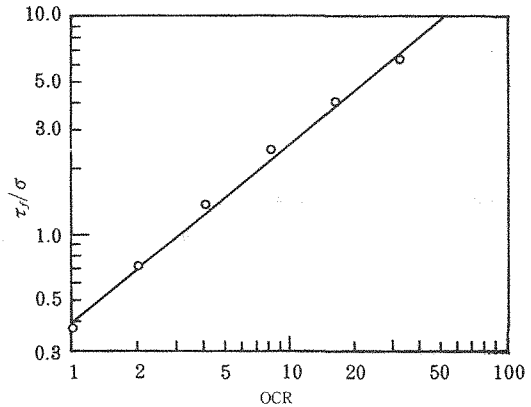


Fig. 4 Relations between over-compression ratio OCR and rate of increase of shearing strength  $\tau_f/\sigma$ .

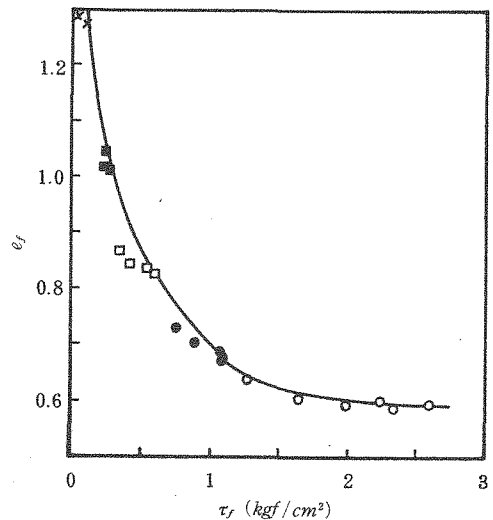


Fig. 6 Relations between void ratio at failure  $e_f$  and shearing strength  $\tau_f$ .

に静的応力を付加する正規圧縮状態では曲線となり、一義的に圧縮指数を求めることはできないが、過圧縮状態では  $\sigma_0$  の大きさに関係なくほぼ平行な直線で表される。また、この図の  $e_f \sim \log \sigma$  と Fig. 3 の  $\tau_f \sim \sigma$  の関係から、 $e_f \sim \tau_f$  の関係を求めると Fig. 6 のようになる。この図の曲線は正規圧縮状態での結果を結んだものであるが、過圧縮状態も含めて  $\tau_f$  が  $e_f$  の影響を大きく受けることが認められる。

#### 4. 有効垂直応力および間隙圧特性

定体積せん断では、供試体の体積はせん断中に一定に保たれ、排水(気)、吸水(気)を生じないから供試体内に動水勾配はなく、過剰間隙圧も発生しない。このため垂直方向の全応力は直ちに有効応力となる。したがって、三軸圧縮試験のように間隙圧を測定しなくても直接に非排水せん断における有効応力の変化を追跡することができる<sup>4)</sup>。

$$\text{間隙圧} = \text{全応力} - \text{有効応力} \quad (4)$$

であるから、

$$\text{間隙圧} = \text{最初の垂直応力} - \text{せん断中の垂直応力} \quad (5)$$

とみなせば、間隙圧特性についてもあわせて検討することができる。

Fig. 7, 8 は定体積せん断時における有効垂直応力のベクトルカーブを、正規圧縮試料と  $\sigma_0 = 6.4 \text{ kgf/cm}^2$  の過圧縮試料について示したものである。なお、図中の○印は全応力表示の破壊線を示す。せん断中に正規圧縮状態ではいずれも垂直応力が減少するが、過圧縮状態では逆に増加することが分かる。これは、せん断による体積変化を許す場合、正規圧縮状態では試料が収縮し、間隙圧が増加するのに対して、過圧縮状態では逆に試料が膨張して、間隙圧が減少し、かつこの傾向は過圧縮比の増加につれて増大することを示すものである。

そこで、式(5)によって求めた破壊時の間隙圧  $u_f$  をせん断当初の垂直応力  $\sigma$  との関係で Fig. 9 に示す。これによれば、Fig. 3 中の破線で示した OCR の等しい  $\tau_f$  線と同様に  $u_f$  線も原点を通る直線で表すことができる。しかし、OCR の増加につれて強度増加率  $\tau_f/\sigma$  が増加するのに対して間隙圧増加率  $u_f/\sigma$  は減少する。そこで、OCR と  $u_f/\sigma$  の関係を式(2)のような形で示すために、まず OCR と  $\sigma'_f/\sigma (= 1 - u_f/\sigma)$  の関係を求めた。これを Fig. 10 に示す。これより

$$(\sigma'_f/\sigma)_{oc} = (\sigma'_f/\sigma_0)_{NC} \cdot \text{OCR}^{\beta} = 0.558 \cdot \text{OCR}^{0.868} \quad (6)$$

$$\sigma'_f = 0.558 \cdot \sigma_0 \cdot \text{OCR}^{-0.132} \quad (7)$$

となる。

$$(u_f/\sigma)_{oc} = 1 - (\sigma'_f/\sigma)_{oc}$$

であるから

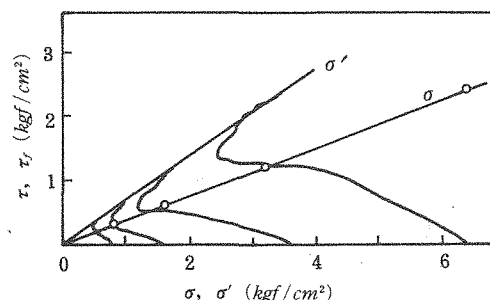


Fig. 7 Vector curves and failure lines (normal compression).

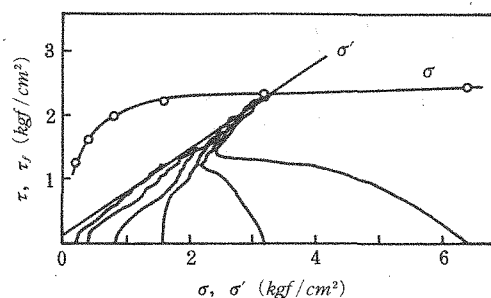


Fig. 8 Vector curves and failure lines (over-compression).

$$(u_f/\sigma)_{OC} = 1 - 0.558 \cdot OCR^{0.868} \quad (8)$$

$$u_f = \sigma_0 \cdot (1 - 0.558 \cdot OCR^{0.868}) / OCR \quad (9)$$

となる。ここで  $(u_f/\sigma)_{OC}$ ,  $(u_f/\sigma_0)_{NC}$  はそれぞれ過圧縮および正規圧縮状態の間隙圧増加率である。したがって、 $(u_f/\sigma)_{OC}$  も OCR のみの関数で表すことができる。沖積粘土では、OCR が 4～8 以上になると  $u_f$  が負になる<sup>5)</sup>ことが報告されているが、静的に圧縮した不飽和土では OCR が 2 程度で 0 になり、それ以下になると負になることが認められる。なお、式(6)の係数については、今後さらに土の種類、含水比（飽和度）を変化させて検討を行う必要がある。

次に、破壊状態に達した時の有効垂直応力  $\sigma'_f$  とせん断強さ  $\tau_f$  の関係を Fig. 3 と対比して Fig. 11 に示す。この結果、不飽和土のせん断強さが正規圧縮、過圧縮状態のいずれを問わず、破壊時の有効垂直応力とほぼ一義的な関係にあることが分かる。

式(1)の  $(\tau_f/\sigma)_{OC}$  と式(6)の  $(\sigma'_f/\sigma)_{OC}$  から、 $\tau_f$  と  $\sigma'_f$  の関係を求めると、

$$(\tau_f/\sigma'_f)_{OC} = (\tau_f/\sigma'_f)_{NC} \cdot OCR^{\alpha-\beta}$$

$$(\tau_f/\sigma'_f)_{NC} = 0.406/0.558 = 0.728$$

となる。ここで、 $\alpha$ ,  $\beta$  の値が等しければ

$$\tau_f = 0.728 \cdot \sigma'_f$$

となり、実験結果も

$$\alpha - \beta = 0.819 - 0.868 = -0.049$$

で、非常に小さい値を示しているため Fig. 11 のような結果となる。

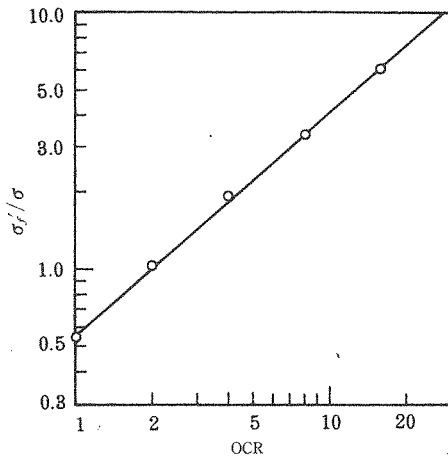


Fig. 10 Relations between over-compression ratio OCR and rate of increase of effective normal stress at failure  $\sigma'_f/\sigma$ .

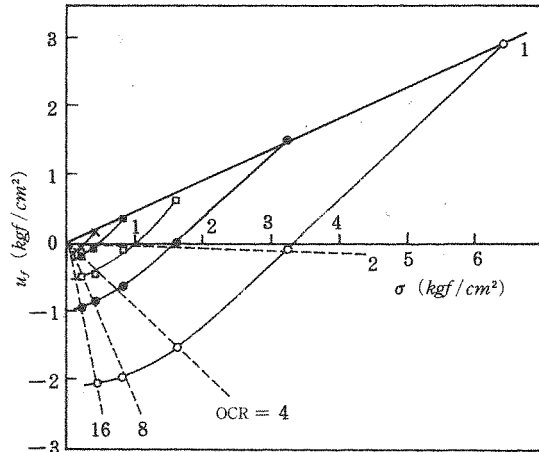


Fig. 9 Relations between initial normal stress  $\sigma$  and pore pressure at failure  $u_f$ .

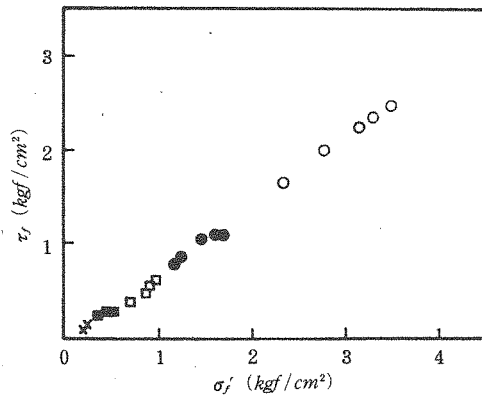


Fig. 11 Relations between effective stress  $\sigma'_f$  at failure and shearing strength  $\tau_f$ .

### 摘 要

本報は、不飽和過圧縮土の圧縮定体積せん断状態でのせん断強度特性を改良型直接せん断試験装置を用いて実験的に検討したものである。

(1) 破壊時のせん断強さ  $\tau_f$ , 有効垂直応力  $\sigma'_f$ , 間隙圧  $u_f$  は, 先行圧縮応力  $\sigma_0$ , せん断時の垂直応力  $\sigma$  および過圧縮比 OCR とすると

$$(\tau_f/\sigma)_{OC} = (\tau_f/\sigma_0)_{NC} \cdot OCR^a$$

$$(\sigma'_f/\sigma)_{OC} = (\sigma'_f/\sigma_0)_{NC} \cdot OCR^b$$

$$(u_f/\sigma)_{OC} = 1 - (\sigma'_f/\sigma_0)_{NC} \cdot OCR^b$$

で表される。なお、添字の OC, NC はそれぞれ過圧縮および正規圧縮状態を示す。

(2) せん断強さは破壊時の有効垂直応力の増加につれてほぼ直線的に増加する。

(3) 間隙圧は過圧縮比が 2 以上になると負になる。

### 謝 辞

本研究を実施するに際して、研究室の卒業生である堀部耕二(現佐賀県庁), 谷垣和彦(現兵庫県庁) 両君の協力を得た。また、本研究は文部省科学研究費(一般研究C: 代表者 藤本昌宣)の補助を受けて行ったものの一部である。付記して謝意を表する。

### 参 考 文 献

- 1) 土質工学会 (1980). 土質試験法. 土質工学会, 449-451
- 2) 石原研而 (1988). 土質力学. 丸善, 177-182
- 3) 西原 晃・平川修治・大野 勲(1987). 静的・動的締固め土の圧縮・強度特性. 不飽和土の工学的性質シンポジウム発表論文集. 土質工学会, 155-160
- 4) 土質工学会 (1980). 土質試験法. 土質工学会, 435-437
- 5) 最上武雄編 (1969). 土質力学. 技報堂, 520-522